

ОТЗЫВ

официального оппонента Щербакова Алексея Владимировича на диссертационную работу Давлятшина Романа Позоловича «Моделирование процесса аддитивного формирования металлических материалов с применением вибрационных воздействий методом гидродинамики сглаженных частиц», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы

Тема диссертации является актуальной в контексте стремительного развития технологий аддитивного производства (АП), которые находят широкое применение в таких отраслях, как авиастроение, машиностроение и медицина. Проволочная наплавка, как один из методов АП, позволяет создавать сложные конструкции с высокой скоростью и минимальными потерями материала. Однако качество наплавляемых изделий часто ограничено такими дефектами, как пористость, дендритная структура и неравномерность текстуры, что снижает их механические характеристики, а также отклонение геометрических параметров наплавляемых валиков от заданных.

Весьма перспективным подходом к улучшению микроструктуры и снижению дефектов является применение вибрационного воздействия в процессе наплавки. Экспериментальные данные свидетельствуют о положительном влиянии вибраций на зеренную структуру и механические свойства, однако их воздействие на геометрические параметры наплавляемых валиков остается недостаточно изученным. Предлагаемый в работе подход, основанный на численном моделировании с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) предоставляет мощный инструмент для решения данной задачи, анализа сложных физических процессов, включая тепломассоперенос, конвективные течения и фазовые

переходы в условиях вибраций. Таким образом, исследование, направленное на разработку математической модели для изучения этих процессов, отвечает современным научным и промышленным потребностям.

Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (179 источников) и приложения. Общий объем работы составляет 134 страницы, включая 23 таблицы и 58 рисунков. Структура работы логична и охватывает как теоретические, так и практические аспекты исследования.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, формулируется цель и задачи диссертационной работы, определяется объект и предмет исследования, а также подчеркиваются преимущества метода гидродинамики сглаженных частиц для моделирования процессов со свободной поверхностью.

В **первой главе** представлен обзор методов математического моделирования процессов тепломассопереноса в аддитивном металлическом производстве. Описывается сравнение сеточных и бессеточных методов, с акцентом на преимущества метода гидродинамики сглаженных частиц для задач с большими градиентами деформаций и свободной поверхностью. Формулируется гипотеза о зависимости геометрических характеристик одиночных валиков от параметров вибрационных воздействий.

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса аддитивного формирования с учетом вибрационных воздействий. Модель включает систему уравнений Навье-Стокса для описания течения расплава как вязко-текучую несжимаемую жидкость, уравнение теплопереноса и фазовых переходов. Вибрационные воздействия описываются как граничные условия через периодическое смещение подложки или проволоки.

В **третьей главе** описывается численная реализация модели на основе программного комплекса LAMMPS, включая проведенные автором

модификации для учета поверхностного натяжения, испарения металла и задания граничных условий. Приводится верификация модели на тестовых задачах и валидация с использованием экспериментальных данных для стали, алюминия и титана.

В **четвертой главе** анализируются результаты численных и натурных экспериментов, демонстрируется влияние направления, частоты и амплитуды вибрационных воздействий на геометрию одиночных валиков.

В **заключении** обобщаются результаты и формулируются выводы исследования.

Работа демонстрирует системный подход, начиная от теоретического анализа и заканчивая экспериментальной валидацией. Особое внимание уделяется влиянию вибраций на процесс формирования валиков, что является ключевым аспектом исследования.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработка математической модели: впервые предложена модель процесса проволочной наплавки с учетом вибрационных воздействий на основе метода гидродинамики сглаженных частиц. Модель рассматривает уравнения гидродинамики, теплопереноса и фазовых переходов, что позволяет учитывать сложные физические процессы, такие как термокапиллярные течения и испарение.

2. Исследование влияния вибраций: проведено комплексное исследование влияния направления, частоты и амплитуды вибраций на геометрические характеристики наплавляемых валиков. Установлено, что вертикальные вибрации увеличивают глубину проплавления, а горизонтальные изменяют ширину валика, что подтверждено экспериментально.

3. Механизм теплопереноса: впервые описан механизм повышения глубины проплавления за счет интенсификации термокапиллярных течений

под воздействием вибраций, что вносит вклад в понимание всего комплекса физических явлений, протекающих при проволочной наплавке.

4. Валидация модели: модель валидирована на основе экспериментальных данных, полученных при наплавке образцов из различных материалов (сталь 12X18H10T, алюминий АМг5, титан ВТ6) на уникальном технологическом оборудовании, что демонстрирует применимость полученных в работе результатов к широкому спектру сплавов.

Практическая и теоретическая значимость результатов работы

Практическая значимость: разработанная модель и программный комплекс (зарегистрированное свидетельство № RU 2022616021) могут быть использованы для расчета параметров процесса проволочной наплавки, включая распределение температуры, скорости течения расплава и геометрию валиков. Это позволяет оптимизировать технологические режимы, улучшая качество изделий и снижая производственные затраты.

Теоретическая значимость: работа углубляет понимание физических механизмов, лежащих в основе влияния вибраций на динамику расплава и процесс кристаллизации. Полученные данные о форме фронта кристаллизации и градиентах температуры могут быть использованы для дальнейших исследований формирования зеренной структуры.

Достоверность научных результатов и обоснованность выводов

Достоверность научных положений, выводов и выносимых на защиту результатов диссертационного исследования подтверждается корректностью принимаемых допущений, обоснованностью методов исследования и сходимостью результатов моделирования с экспериментальными и известными литературными данными.

Основные результаты диссертации изложены в восьми статьях из перечня ВАК и/или входящих в международные базы цитирования.

Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных мероприятиях всероссийского и международного уровней.

Замечания

1. Выбор параметров дискретизации (размер частиц, временной шаг) обоснован, но при этом, в тексте работы не указано, может ли повышение частоты задаваемых вибраций влиять на устойчивость численной схемы, что важно для точности моделирования.

2. В диссертации демонстрируется, что вибрационные воздействия влияют на геометрию одиночных валиков и степень воздействия будет зависеть от амплитуды и частоты колебаний, однако не указано, представляется ли возможность решения задачи оптимизации для достижения желаемой формы одиночных валиков с помощью разработанной модели.

3. В диссертации рассмотрено влияние параметров сглаживающего ядра на точность моделирования процессов тепломассопереноса и геометрии наплавленных валиков, однако отсутствует анализ чувствительности результатов к выбору типа ядра (например, кубического сплайна или Гауссова ядра), что ограничивает понимание устойчивости и надежности модели при варьировании этих параметров.

Заключение

Сделанные замечания не снижают научной значимости представленной диссертационной работы и высокого квалификационного уровня диссертанта. Диссертация является законченной научной-квалификационной работой, выполненной под руководством доктора технических наук, профессора кафедры Сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского университета Д.Н. Трушникова. В диссертации получены результаты, позволяющие

квалифицировать их как решение актуальной научной задачи, значимой с точки зрения подходов математического моделирования процессов металлического аддитивного производства. Текст автореферата и диссертации, а также основные публикации, подготовленные автором по теме исследования, полностью отражают суть проделанной работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация удовлетворяет требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и от 12.10.2018 № 1168), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
доктор технических наук по специальности 05.09.10 – Электротехнология, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1, эл. почта ShcherbakovAV@mpei.ru.

_____/ А. В. Щербаков
Я, Щербаков Алексей Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Давлятшина Романа Позоловича, и их дальнейшую обработку.

_____/ А. В. Щербаков
Подпись официального оппонента заверяю,
Заместитель начальника отдела по работе с персоналом
ФГБОУ ВО «НИУ

_____/ Л. И. Полевая